Title	クロスロードゲームのダイナミクス(基研長期研究会「複雑系2」～物理から生物・進化・ゲームへ～,研究会報告)
Author(s)	松尾, 則之; 池上, 高志
Citation	物性研究 (1994), 61(5): 459-465
Issue Date	1994-02-20
URL	http://hdl.handle.net/2433/95237
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

クロスロードゲームのダイナミクス

松尾 則之 *
池上 高志 †
神戸大学大学院自然科学研究科
神戸市灘区六甲台町１－１

1993年10月30日

1　始めに

自然界の中には群れをなして行動している動物がある。例えば鳥の群や、魚の回遊、草食動物などがある。人間社会でもクラスの仲良しグループとか政治団体とか暴走族などがある。その構成員達は外側からみると、一見お互いに協力をしているようにみえる。これはどういう機構によるものなのだろうか？本当に協力をし合っているのだろうか？このことを調べるために、クロスロードゲーム [1] のシミュレーション [2] をした。

クロスロードゲームとは２次元平面上でプレイヤー達が囚人のジレンマゲーム [3, 4] をするというものである。囚人のジレンマゲームは協調性を調べるときに使われる典型的なゲームであり、アクセルロッドによるトーナメントが有名である。ゲームをするプレイヤーはお互いにただ二つの手を持っていて、それを出し合うことによりある点数が貰える。二つの手は”協調”と”裏切り”とよばれる。その得点は協調ー協調の場合は、お互いにＲの得点を、裏切りー裏切りの場合はお互いにＰの得点を、協調ー裏切りの場合は協調の方はS、裏切りの方はＴの得点を得るというものであり、2R ＞ S+T とＴ＞Ｒ＞Ｐ＞Ｓという条件を満たすものである。この論文では T=0,R=－2,P=－4,S=－５である。この条件により自分一人のことだけ考えれば裏切ったほうが得であり、全体の利益を考えれば協調したほうが得になるというジレンマが生じる。

先程述べたトーナメントではＴＦＴ（しっぺ返し）と呼ばれる戦略が２度に渡り勝利をおさめた。これは前回の相手の出した手を真似するというものである。このトーナメントは同じ相手を識別できることが前提となっている。また一度に戦う人数は二人ずつである。しかし、自然界ではいつでも個体を識別できるとは限らないし、戦う人数も二人とは限らない。このシミュレーションでは、平面上で出会ったプレイヤー達がゲームをすることにより、二人以上のゲームに拡張されている。また、各プレイヤーがグループに所属することにし、個人識別をするのをやめグループ識別だけをすることにした。これにより、戦略は個人がどのグループに所属するかによって決める。

2　モデル

基本モデル

*E-mail address : nobita@grad710f.scitec.kobe-u.ac.jp
†E-mail address : ikeg@grad710g.scitec.kobe-u.ac.jp

先ほど説明したように、10×10の2次元トーラス格子上を50人のプレイヤーがランダムに動き回っている。一回動くことをラウンドとよび、100ラウンドを1ステップとよぶ。各プレイヤーは協調の確率パラメーターp、q、τとグループIDを持っている。p、q、τがそのプレイヤーの戦略を特徴づける。例えばTFTは$p=1$、$q=0$で表される。グループIDは整数値で付けられ、同じID番号を持つプレイヤーは同じグループに属する。初め、それらはランダムである。そして、交差点で出会う度にゲームをする。その時の手はただひとつで、自分を除くプレイヤー一人ずつと対戦し、合計得点を得る。つまりその交差点で、あるプレイヤーが"協調"を出すと決めたらどのプレイヤーにも"協調"を出す。

どのような手を出すかは前ラウンドのグループ間の状況と今回の交差点の状況による。その交差点に自分と同じグループに所属するプレイヤーのみの場合は、確率τで協調する。自分のグループ以外のプレイヤーがいた場合は前ラウンドで自分のグループに属するプレイヤーに協力してくれたグループのプレイヤーが多いときは確率pで協力する。前ラウンドで非協力的なグループに属するプレイヤーが多いときは確率qで協力する。1ステップ毎に順位を付け下位3プレイヤーのグループIDとパラメーターp、q、τを上位3プレイヤーのグループIDとパラメーターp、q、τにそれぞれ付け替える。また、ランダムミューテーションを入れておき、IDとp、q、τを1ステップ毎に0.02の確率でランダムに付代える。

ルール(1)

順位は利得表によって得た得点をそのまま付ける。

ルール(2)　交差点と交差点の間の道で渋滞する場合

ある交差点に自分を含めてをn人のプレイヤーが居た場合得点は、その場所での合計得点をn-1でわる。そしてその得点が-2以上なら次の交差点に進み、-2未満なら次の交差点に進むのにその場所での合計得点の絶対値分だけ休んでから次の交差点に進む。これは、交差点での勝負に負けたプレイヤーは交差点は通り抜けることができるが次の交差点に辿り着くのに時間がかかるということである。この場合はすでに交差点に進入しているわけであるから、その交差点はともかく通り抜けている。そして交差点間の距離を1単位距離として、1ステップでどれだけ単位距離を得たかによって順位をつける。今回はジレンマゲームの得点はその交差点での勝負を決めるだけで、局所的な得点に過ぎない。

ルール(3)　交差点の手前でで渋滞する場合

進むか進まないかという基準はルール2とおなじだが交差点を通り抜けられないところがルール2との違いである。つまりあるプレイヤーが-2点以下だった場合、次のラウンドもその交差点の手前にいてもし他のプレイヤーが来た場合はそのプレイヤーとまた対戦をする。その結果によりまたどれだけ留まっていなければならないかを決める。ルール2ではともかくある回数だけ休めば次の交差点に行くことが出来たが、今度は状況によってはずっと同じ交差点に居続けなければならない。

3　結果

3.1　ルール１に対する結果

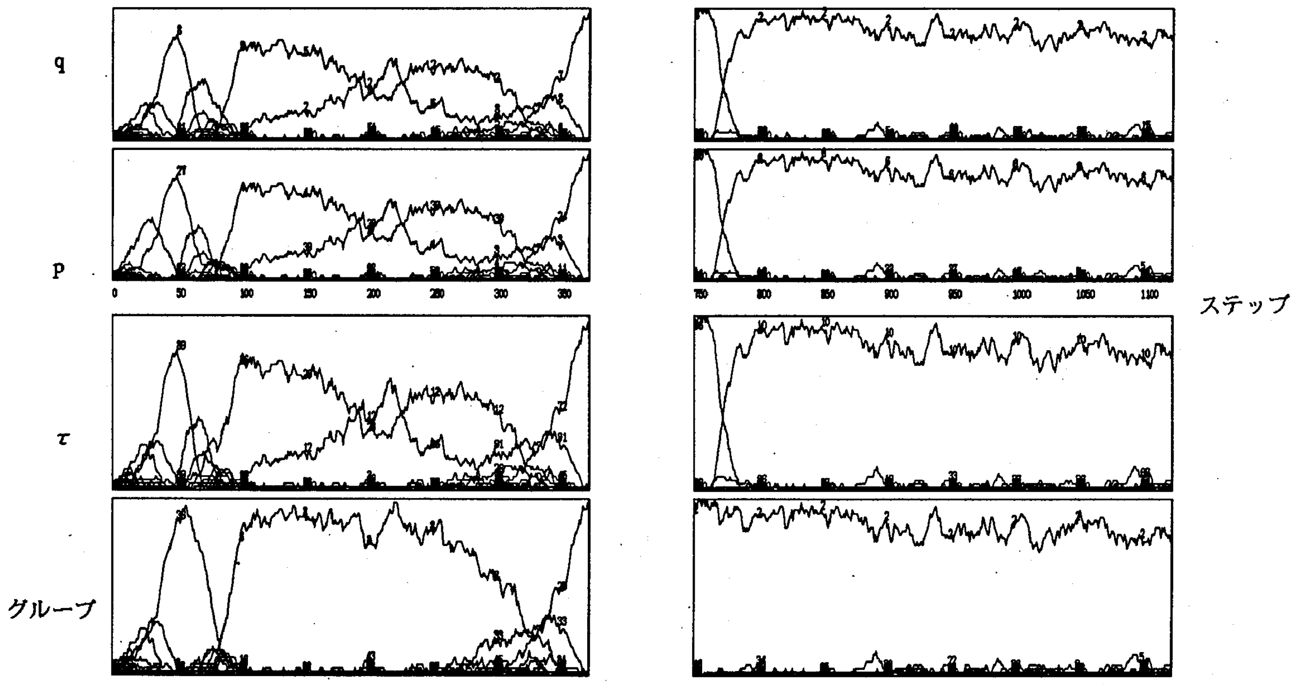

図 1:
真ん中の数字はステップである。一番下の段はどのグループがどれだけいるか、下から２番目、３番目、４番目はあるτの値（％）、ｐの値（％）、ｑの値（％）を持ったプレイヤーがどれだけいるかをあらわしている。５０ステップ付近から、３６グループが優勢になる。３６グループの持っているパラメーターτは８９％で仲間に対してはかなり協調性が高い。そのあと８０ステップ付近から優勢になりだした、８グループはτが２６％から１２％へと下がっている。その後２５グループが３３０ステップ付近から台頭してくる。左の図と右の図の間は途中省略してあり、７５０ステップから続きを描いてある。２グループが７５０ステップのときは優勢であるが、ミューテーションを受けてτが１０％、ｐが６％、ｑが２％のプレイヤー達に変化した。

図１の横軸はステップで、下から２段目と３段目の間の数字がステップ数である。縦軸は下からグループＩＤ、τの値（％）、ｐの値（％）、ｑの値（％）を持っているプレイヤーの人数である。それぞれ最高で５０プレイヤーである。。図１がルール１のシミュレーションの結果である。図１の２５ステップ付近から５０ステップにかけてでグループＩＤ＝３６が優勢になってくる。その時３６グループのパラメーターは $\tau = 0.89$、$p = 0.29$、$q = 0.08$ である。５０ステップ付近で一番下のグラフはほとんど頂点に達しているのにτ、p、qがそこまで達していない。これはミューテーションを受けたために同じグループでありながら、違うパラメータを持ったためである。もっとはっきりわかるのは次の８０ステップ付近から優勢になりだした、８グループのパラメーターである。グループ自体は３００ステップ付近まで優勢であるにもかかわらずパラメータが $\tau = 0.26$ から 0.12 に、$p=0.04$ から 0.39 に、$q=0.05$ から 0.02 に入れ替わっている。ミューテーションによりτ=26 にかわりτ=12 を持つものが現われ、周りよりも協調のパラメーターが低いために点数を稼ぎ、８グループの中で優勢になった。しかし、$p=0.39$ とあまり外部にたいして厳しくないため、他のグループの台頭を許す結果となった。その他のグループとは３３０付近から優勢になりつつある２５グループである。この２５グループもまた $\tau = 0.72$ と仲間に対しては高い協調のパラメーターを持っている。２５グループもまたミューテーショ

ンにより外部に対する抵抗力を失い、絶滅する。そのような変遷を繰り返しながら最終的に生き残るのは、２グループである。今度はミューテーションを受けた後も、p=0.06、q=0.02 と外部に対しても非常に低い協調のパラメーターを持っているため、７０００ステップを過ぎてもこのまま優勢であり続けた。

このモデルでは初めグループが優勢になるときは、τ の値は高く、味方に対して協調しているグループが有利である。しかし、まわりがほとんど自分と同じグループになったときは τ の値は低ければ低いほど有利になる。そのためあるグループが優勢になったときその中のプレイヤーがミューテーションを受けて現在の τ よりも低い値になったとすると、そのパラメーターを持ったものが増えてくる。しかし τ 以外のパラメーターもミューテーションを受けるためうまく p と q が小さくなればよいが、ならなかった場合自分のグループには非協調でありながら他のグループに対して協調するようになり、他のグループに取って代わられる。このとき出てくるグループも、τ は高く仲間に協調する。これを数回繰り返した後 p、q、τ の全てが低いものが出現し安定する。

3.2　ルール２の結果

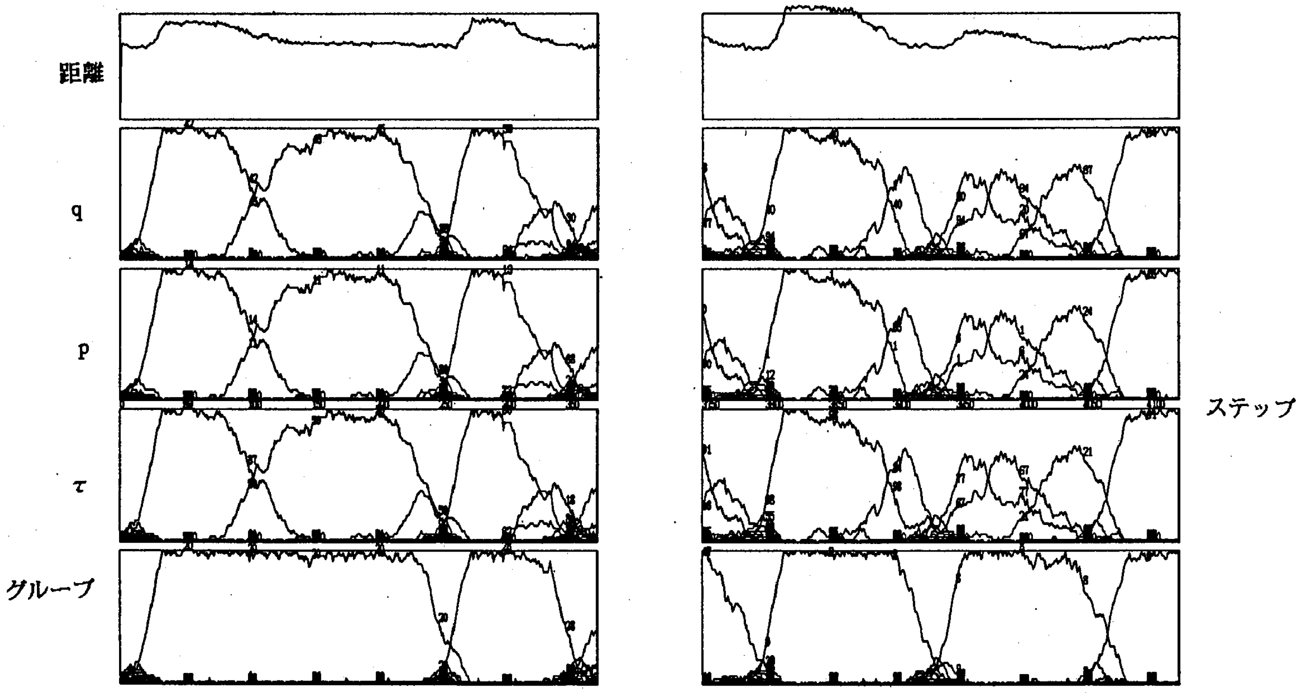

図 2:
図１との違いは一番上の段である。一番上の段は走った距離を表している。下の４段は図１と同じである。１０ステップくらいから２０グループが台頭してくる。τ の値が８７でかなり協調的である。９０ステップ付近で、ミューテーションを受けて、τ が低くなる。このグループは２５０ステップ付近で絶滅し、新たに、２８グループに代わられる。しかしこのグループもミューテションを受けた後、絶滅する。となりの図は、３７００ステップ付近まで省略した後の図である。これはずっと落ち着かず、台頭〜絶滅〜台頭を繰り返す。

図２はほとんど図１と同じことを表示しているが、一番上の段はプレイヤーの進んだ距離の全プレイヤーの合計を示している。最高は５０プレイヤー×１００ラウンドで５０００単位距離である。下の４段は先程と同じで最高で５０プレイヤーである。図２の１０ステップ付近でＩＤ＝２０のグループが

優勢になってくる。２０グループの持っているパラメーターは $\tau=0.87$、$p=0.14$、$q=0.42$ である。このとき１番上の段をみると２０グループが優勢になるに従って、距離の合計も伸びている。その後１００ステップ付近でミューテーションをうけ、パラメーターが $\tau=0.87$ から 0.50、$p=0.14$ から 0.11、q=(から 0.45 に変わる。それに伴って、距離の方も落ちている。そして、２５０付近でグループＩＤ＝２８、$\tau=0.90$、$p=0.13$、$q=0.58$ に代わられる。ここでも、距離が伸びている。

ルール２の結果も、あるグループが優勢になるときは、τ の値が大きい。その後、グループは代わらないのに、ミューテーションを受けて、τ の値が小さくなるのもそして新しいグループが出現するのもルール１と同じである。今度もまわりが同じグループで協調してくれるのであれば、協調しないほうが得である。しかしルール１と違っていつまでも他のグループにかわられ安定しない。新しく優勢になったグループもはじめは τ の値は高く距離は伸びるが、その後そのグループの中で τ の低いものが現われ、距離が落ちさらに新しいグループが出現する。これを繰り返し、いつまで経っても安定しない。

3.3　ルール３の結果

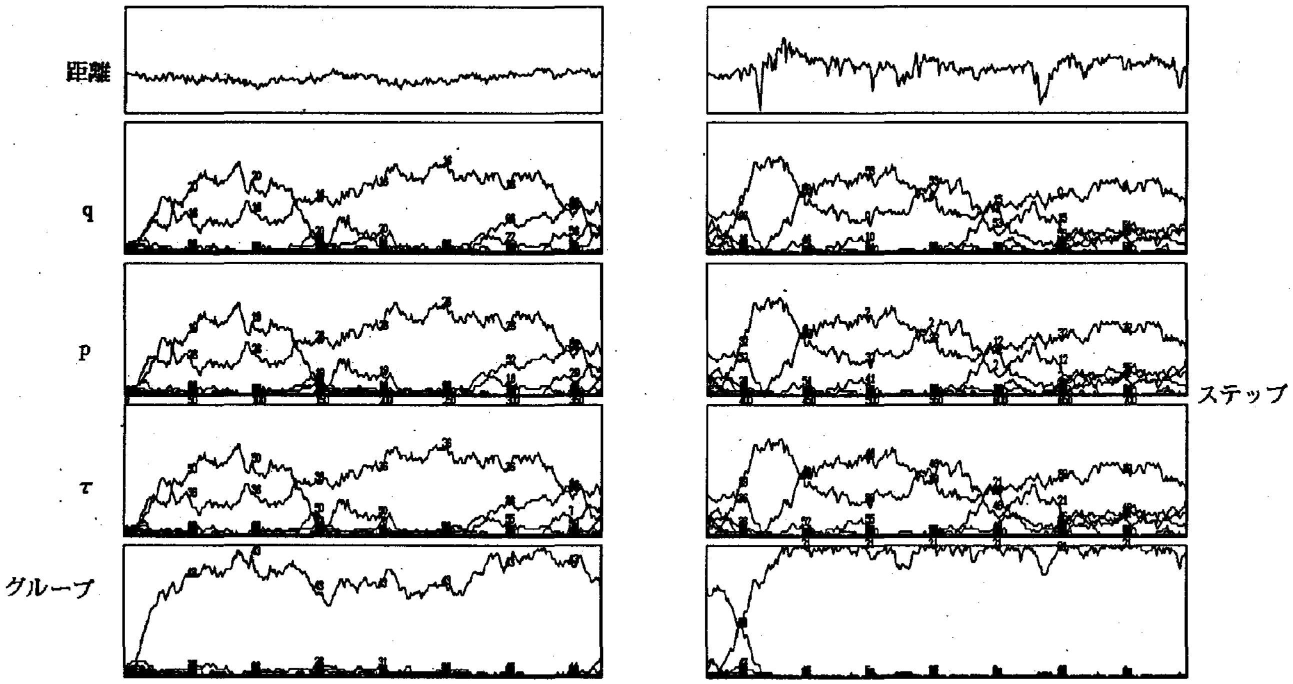

図 3:
図の見方は図２と同じである。まず、４３グループが台頭してくる。パラメーターが初めから２つに分化している。τ は５０％と３６％に、ｐは１９％と２８％に、ｑは２０％と１６％に分化している。その後、右の図で４００ステップ付近で、２１グループに代わられるが、このグループも二つのパラメーターを持ったプレイヤー達にわかれる。

先程の二つのモデルとは顕著な違いがある。同じグループ内で違うパラメーターを持つ集団に分れることである。グループＩＤ＝４３が１０ステップ辺りがら優勢になり始めるが、そのパラメーターは $\tau=0.50$、$p=0.19$、$q=0.20$ を持っているプレイヤー達と $\tau=0.36$、$p=0.28$、$q=0.16$ を持っているプレイヤー達に分れる。２００ステップ付近で $\tau=0.50$ を持っているプレイヤー達が絶滅し、新たに２５０ステップ付近で $\tau=0.86$、$p=0.52$、$q=0.66$ を持ったプレイヤー達が現われる。４００ステップ付近

で４３グループが絶滅し、ＩＤ＝２１が優勢になり、τ =0.46、p=0.02、q=0.53 を持っているプレイヤー達と τ =0.89、p=0.32、q=0.00 を持っているプレイヤー達に分れる。

なぜ同じグループに二つの集団が出来るのかを、解析するために、プレイヤー達のパラメーターを固定したシミュレーションをした。まず、グループＩＤを一つに固定した。これにより、ｐとｑはこのシミュレーションではどんな値を持っているか関係なくなる。そして、τ の値を 0 から 0.9 まで 0.1 刻みで１０種類のパラメータを５０人のプレイヤーに一つずつ持たせる。一つのパラメーターにつき５人のプレイヤーが持っていることになる。これの結果が図４である。横軸は τ の値で、縦軸はその

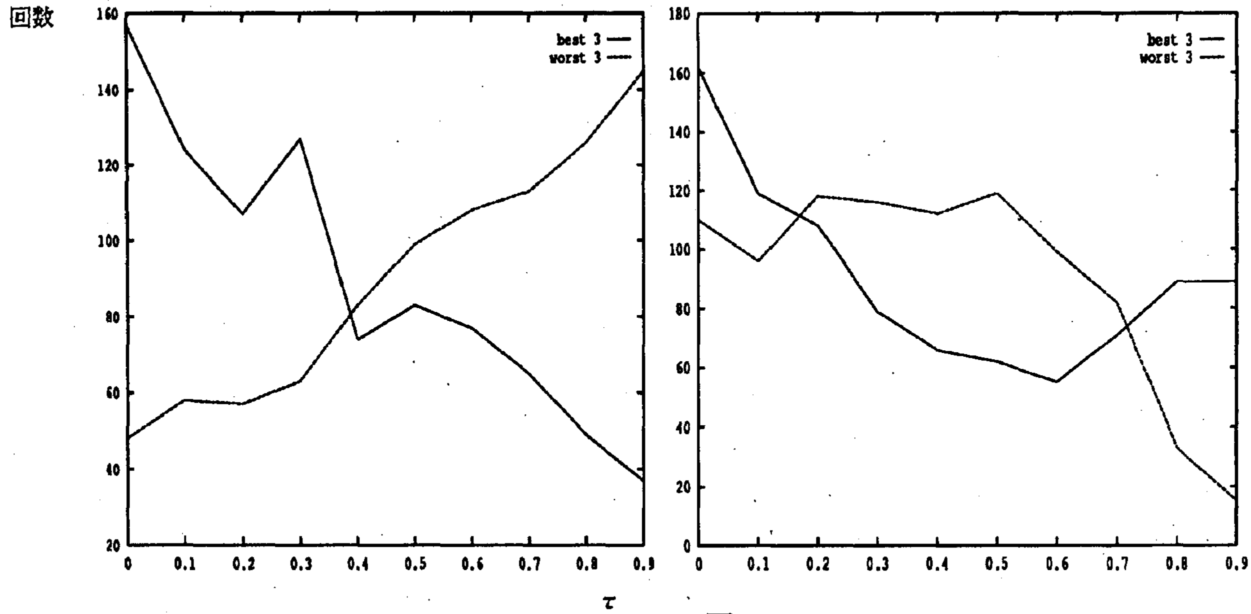

図 4:
縦軸はベスト３又はワースト３に入った回数である。横軸は協調の確率である。それぞれ５プレイヤーずついる。左の図がモデル２に対する結果である。右の図がモデル３に対する結果である。ベスト３に入る回数は協調すればするほど低くなり、ワースト３に入る回数が増える。逆に非協力になればなるほど、ベスト３に入る回数が増え、ワースト３に入る回数は減る。ところが右の図では、非協力なほどベスト３に入る回数は増えているが、ワースト３にも結構入っている。協調すればするほどワースト３に入る回数は減っている。

パラメーターを持ったプレイヤー達が何回 best3 と worst3 に入ったかの回数である。試行回数は３００ステップである。τ =0 のパラメーターを持ったプレイヤー達は、１６２回 best3 に入り、１１０回 worst3 に入っている。τ =0.9 のパラメーターを持ったプレイヤー達は、８９回 best3 に入り、１５回 worst3 に入っている。つまり同じグループに所属するプレイヤーばかりのとき、τ の値が低ければ低いほど、順位が上になれるが、最下位になる回数も増える。しかしながら、τ の値が高いプレイヤー達も特別に多く best3 に入っているわけではないが、worst3 に入る回数が極端に少ない。τ の低いほうも高いほうも、best3 に入っている回数が worst3 に入っている回数よりも、に多い。これに対して中間辺りの τ を持ったプレイヤー達は、best3 に入る回数よりも、worst3 に入る回数が多い。

このパラメーターを固定したシミュレーションにより次のことがいえる。τ はやはりある程度高くないとグループが優勢になれないが、他のモデルと違い、ある一つのグループが優勢になった後でも、τ の値が低ければ得というわけではない。ある程度低い τ を持った集団が増えてくると、お互いに交差点で出会うことが多くなり、距離を稼ぐことが出来なくなる。τ の大きい集団も以外と不利になるわけではなく、暴走するプレイヤー達がいなくなるのを待って、進めるので中途半端に非協力であるよりも、非常に協力的であった方がよい。そのため非常に協力的な集団と非協力的な集団に分化する。

4　まとめ

どのモデルでも優勢となるグループは τ の値が大きい。つまり、グループを作るときは仲間同志で協調する必要がある。パラメーター p と q はそのグループが優勢になるかどうかと余り相関がない。グループ内部に対するパラメーター τ が大きければグループの得点は上昇し、グループの勢力は増す。そのためにグループが大きくなるときは τ が大きい必要がある。

しかし一度グループが優勢になった後では p、q の値の進化はモデルによってかなり違う。p と q が小さいほどよいのはどれでも同じである。p=1、q=0 のときグループ対グループのＴＦＴ的な戦略となるが個人対個人のときと違い有力な戦略とはなりえない。個人対個人のことを考えれば、ＴＦＴ戦略がいいかも知れないが、グループ対グループのときはとにかく他のグループに対して非協力的な方がよい。p と q が大きいと他のグループに協力することになり、他のグループの台頭を許すこととなる。基本モデルでは一度優勢になってしまえば τ は大きいままである必要はない。図１で見たように、τ の値が小さくても、グループを維持していくことが出来る。これに対してルール２とルール３では τ の値が小さいと、グループを維持していることができない。ただジレンマゲームの得点で順位を付けるだけでは、出来なかった自然に τ を大きくしておく機構がもう一つの基準を設けることにより、自然に現われてきた。特にルール３ではグループ内で集団が二つ出来、内部で罰を与える機構が予期せず現われたことが興味深い。自然界のグループを作っている動物達も、お互いを認識出来なくても、このような機構のために協調が失われずにいるのではないだろうか？

参考文献

[1] Mesterton-Gibbonds,M. *An Introduction to Game-Theoretic Modeling* (Addison-Wesley Publishing Company,Inc.1992)

[2] Maynard,S.J.*Evolution and Theory of Games.*(Cambridge University press, Cambridge,U.K.

[3] Axelrod,R. *The evolution of Cooperation*(Basic,Books,1984).

[4] Axelrod,R and Hamilton,W.D.*Science* **211**,1390-1396(1981).